

Г.В. Новиков, канд. техн. наук, В.А. Андилахай,
О.С. Кленов, Харьков, Украина

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОЕМКОСТИ ОБРАБОТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Произведена аналитическая оценка энергии резания и трения в общем энергетическом балансе шлифования, сформулированы основные направления снижения энергоемкости обработки при шлифовании

Основным недостатком процесса шлифования является его высокая энергоемкость, что приводит к значительным погрешностям обработки и возникновению температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях [1,2]. Существуют различные технологические приемы снижения энергоемкости обработки при шлифовании, связанные главным образом с уменьшением интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом. Это применение импрегнированных (термообработанных), высокопористых и прерывистых абразивных кругов, использование эффективных методов правки круга, технологических сред и т.д. [3]. Вместе с тем, в настоящее время недостаточно изучены условия формирования энергетических параметров шлифования. Отсутствуют теоретические основы раздельного учета доли резания и доли трения в общем энергетическом балансе шлифования. А это не позволяет научно обоснованно подойти к выработке условий снижения энергоемкости обработки. Поэтому целью работы является разработка математической модели определения энергоемкости обработки с учетом процессов резания и трения при шлифовании.

Как показано в работах [4,5], энергоемкость обработки по физической сути и размерности соответствует условному напряжению резания σ , равному отношению тангенциальной составляющей силы резания к суммарной мгновенной площади поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга (при лезвийной обработке – площади поперечного сечения среза). Поэтому в работе поставлена задача аналитического определения условного напряжения резания σ при шлифовании. Для этого первоначально рассмотрим схему шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью $V_{\text{рм}}$, рис. 1,а. Возникающие тангенциальную P_z и радиальную P_r составляющие силы резания представим в виде

$$P_z = P_{z_{\text{рез}}} + P_{z_{\text{тр}}}; \quad P_r = P_{r_{\text{рез}}} + P_{r_{\text{тр}}}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} P_z &= \sigma \cdot S_{\text{сум}} = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{\text{кр}}}; \\ P_{z_{\text{рез}}} &= \sigma_{\text{рез}} \cdot S_{\text{сум}} = \sigma_{\text{рез}} \cdot \frac{Q}{V_{\text{кр}}}; \\ P_{\text{тр}} &= P_{r_{\text{тр}}} \cdot f = c \cdot y_{\text{уп}} \cdot f; \\ P_{r_{\text{тр}}} &= \frac{P_{z_{\text{тр}}}}{K_{\text{упр}}} = c \cdot y_{\text{рез}} \end{aligned} \quad (2)$$

где $P_{z_{\text{рез}}}$, $P_{r_{\text{рез}}}$ – составляющие силы резания, обусловленные процессом резания зернами круга, Н; $P_{z_{\text{тр}}}$, $P_{r_{\text{тр}}}$ – составляющие силы резания, обусловленные процессом трения связки круга с обрабатываемым материалом, Н; σ – условное напряжение резания (энергоемкость шлифования), Н/м²; $S_{\text{сум}} = Q/V_{\text{кр}}$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м²; Q – производительность обработки, м³/с; $V_{\text{кр}}$ – скорость круга, м/с; $\sigma_{\text{рез}}$ – условное напряжение резания (учитывает процесс резания зернами круга, но не учитывает трение связки круга с обрабатываемым материалом), Н/м²; f – коэффициент трения связки круга с обрабатываемым материалом; c – приведенная жесткость технологической системы, Н/м; $y_{\text{уп}} = (V_{\text{рез}} - V_{\text{рм}}) \cdot \tau$ – величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе вследствие неполного съема подводимого в зону резания обрабатываемого материала, м; $V_{\text{рез}}$ – линейная скорость съема обрабатываемого материала, м/с; τ – время обработки, с; $K_{\text{упр}} = P_{z_{\text{тр}}}/P_{r_{\text{тр}}}$; $y_{\text{рез}}$ – величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе вследствие внедрения режущих зерен круга в обрабатываемый материал, м.

Первая зависимость (1) с учетом соотношения $Q = V_{\text{рез}} \cdot S$ примет вид

$$\sigma = \sigma_{\text{рез}} + \left(\frac{V_{\text{рез}}}{V_{\text{рм}}} - 1 \right) \cdot \frac{c \cdot f \cdot \tau \cdot V_{\text{кр}}}{S}, \quad (3)$$

где S – площадь поперечного сечения обрабатываемого образца, м².

Из зависимости (3) следует, что при условии $V_{\text{рез}} = V_{\text{рез0}}$, т.е. когда происходит полный сьем подводимого в зону резания обрабатываемого материала, второе слагаемое равно нулю и условное напряжение резания σ (энергоемкость шлифования) обусловлено лишь процессом резания, трение связки круга с обрабатываемым материалом отсутствует. Если же шлифовальный круг не обеспечивает полный сьем подводимого в зону резания обрабатываемого материала, то $V_{\text{рез}} > V_{\text{рез0}}$ и в контакт с обрабатываемым материалом вступает связка. В результате второе слагаемое зависимости (3) принимает значение, отличное от нуля, и условное напряжение резания σ определяется суммой двух слагаемых.

Причем, с течением времени обработки τ второе слагаемое увеличивается (даже при постоянной скорости $V_{\text{рез0}}$), что ведет к увеличению условного напряжения резания σ и необходимости прекращения процесса шлифования.

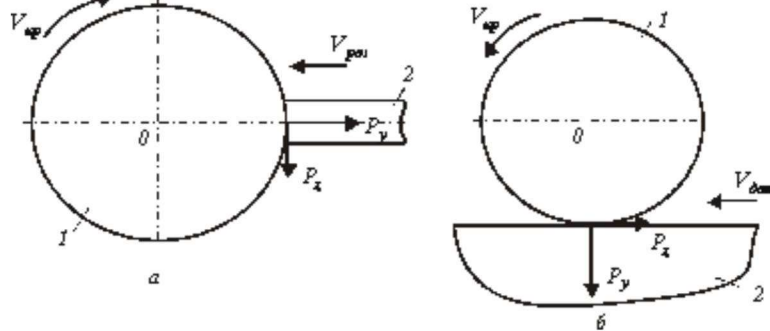


Рис. 1. Расчетная схема параметров шлифования: 1 – круг; 2 – деталь

Даже при небольшом отличии величин $V_{\text{рез}}$ и $V_{\text{рез0}}$ второе слагаемое зависимости (3) с течением времени обработки τ будет принимать относительно большие значения, осуществление процесса шлифования при которых невозможно. Например, при $V_{\text{рез}} / V_{\text{рез0}} = 2$; $c = 10^3$ кгс/мм; $\tau = 60$ с; $f = 0,5$; $V_{\text{шп}} = 30$ м/с; $S = 20$ мм² второе слагаемое зависимости (3) равно $15 \cdot 10^6$ кгс/мм². Как видно, данная величина многократно (в тысячи раз) превышает предел прочности на сжатие обрабатываемого материала и соответственно первое слагаемое зависимости (3), что свидетельствует о невозможности ведения процесса шлифования в таких условиях. Из этого вытекает, что при

шлифовании необходимо обеспечить равенство скоростей $V_{\text{рез}}$ и $V_{\text{рез0}}$ за счет применения кругов с повышенной режущей способностью, фактически исключающих контакт связки с обрабатываемым материалом. Для этого круг должен обеспечивать увеличенное выступание режущих зерен над уровнем связки и свободное размещение продуктов обработки в его межзеренном пространстве при шлифовании. Важно также в процессе шлифования поддерживать высокую режущую способность круга, не допуская уменьшения $V_{\text{рез0}}$ в связи с износом и затуплением режущих зерен.

В противном случае отношение $V_{\text{рез}} / V_{\text{рез0}}$ с течением времени обработки будет увеличиваться и приводить к росту условного напряжения резания σ .

С физической точки зрения существенное увеличение второго слагаемого зависимости (3) с увеличением времени обработки τ обусловлено ростом величины упругого перемещения $y_{\text{уп}} = (V_{\text{рез}} - V_{\text{рез0}}) \cdot \tau$. При условии $V_{\text{рез}} = V_{\text{рез0}}$ данная величина равна нулю. В этом случае, как показано выше, условное напряжение резания σ будет зависеть от силовой напряженности процесса резания зернами круга и не зависеть от интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом.

При условии $V_{\text{рез}} > V_{\text{рез0}}$ условное напряжение резания σ будет определяться главным образом вторым слагаемым зависимости (3). Уменьшить его можно уменьшением параметров c , f , τ , $V_{\text{шп}}$ и увеличением S . Следовательно, с точки зрения уменьшения σ целесообразно $V_{\text{шп}}$ уменьшать. Однако, это справедливо при условии $V_{\text{рез}} > V_{\text{рез0}}$. При условии $V_{\text{рез}} = V_{\text{рез0}}$ из-за отсутствия второго слагаемого зависимости (3) скорость круга $V_{\text{шп}}$ не будет влиять на σ .

Необходимо отметить, что в процессе шлифования всегда будет иметь место упругое перемещение $y_{\text{уп}}$, обусловленное вдавливанием режущих зерен в обрабатываемый материал. Однако данная величина связана с первым слагаемым зависимости (3) и не оказывает влияния на второе слагаемое, т.к. в общем случае описывается зависимостью

$$y_{\text{уп}} = \frac{P_{\text{рез}}}{c \cdot K_{\text{упрез}}} = \frac{\sigma_{\text{рез}}}{c \cdot K_{\text{упрез}}} \cdot \frac{Q}{V_{\text{шп}}} \quad (4)$$

Как видно, величина $y_{\text{уп}}$ определяется главным образом отношением $\sigma_{\text{рез}} / K_{\text{упрез}}$ и производительностью обработки Q . Чем больше эти параметры, тем больше $y_{\text{уп}}$. Таким образом показано, что при выполнении условия

$V_{рез} = V_{рез0}$ фактически исключается трение связи круга с обрабатываемым материалом, составляющие силы резания P_{zm} , P_{zn} равны нулю, а условное напряжение резания σ обусловлено лишь процессом резания зернами круга, что резко снижает энергоёмкость шлифования.

Традиционно считается, что увеличение составляющих силы резания P_z , P_f и условного напряжения резания σ при шлифовании вызвано в основном затуплением зерен круга. В действительности, как показано выше, это связано с невыполнением условия $V_{рез} = V_{рез0}$ даже при работе острым кругом, в результате чего второе слагаемое зависимости (3) с течением времени обработки τ непрерывно увеличивается, вызывая рост σ и соответственно составляющих силы резания P_z , P_f .

Из зависимости (4) вытекает, что уменьшить σ и составляющие силы резания P_z , P_f можно за счет уменьшения коэффициента трения f связи круга с обрабатываемым материалом. Однако этим можно лишь уменьшить второе слагаемое зависимости (3), тогда как выполнением условия $V_{рез} = V_{рез0}$ – его исключить.

Определим условное напряжение резания σ при плоском шлифовании, рис. 1,б. Для этого воспользуемся зависимостями (2) с учетом соотношений

$$Q = B \cdot V_{дм} \cdot t_{\phi}; \quad y_{сп} = (t - t_{\phi}) \cdot n, \quad (5)$$

где B – ширина шлифования, м; $V_{дм}$ – скорость детали, м/с; t и t_{ϕ} – номинальная и фактическая глубины шлифования, м; n – количество проходов круга.

Подставляя соотношение (5) в (3), имеем

$$\sigma = \sigma_{рез} + \left(\frac{t}{t_{\phi}} - 1 \right) \cdot \frac{c \cdot f \cdot n \cdot V_{сп}}{B \cdot V_{дм}} \quad (6)$$

Как видно, по структуре зависимость (6) идентична зависимости (3) с тем отличием, что во втором слагаемом содержатся новые параметры: n и t/t_{ϕ} . Чем они больше, тем больше условное напряжение резания σ . Поэтому все выводы, сделанные при анализе зависимости (3) применительно к схеме шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью $V_{рез}$, остаются справедливыми и применительно к схеме плоского шлифования. Исключить второе слагаемое в зависимости (6) и таким образом уменьшить σ можно при условии $t = t_{\phi}$. Это достигается увеличением высот выступания вершин зерен над уровнем связи круга и исключением контакта связи круга с обрабатываемым материалом. Следовательно, необходимым условием снижения энергоёмкости шлифования следует рассматривать обеспечение увеличенного выступания вершин зерен над уровнем связи круга, рис. 2. Достаточным условием является своевременное удаление с рабочей поверхности круга затупившихся зерен за счет применения эффективных методов правки круга или осуществления работы круга в режиме самозатачивания. Это позволит, во-первых, поддерживать в процессе шлифования на заданном уровне величину $\sigma_{рез}$, а во-вторых, обеспечит увеличенное выступание вершин зерен над уровнем связи круга.

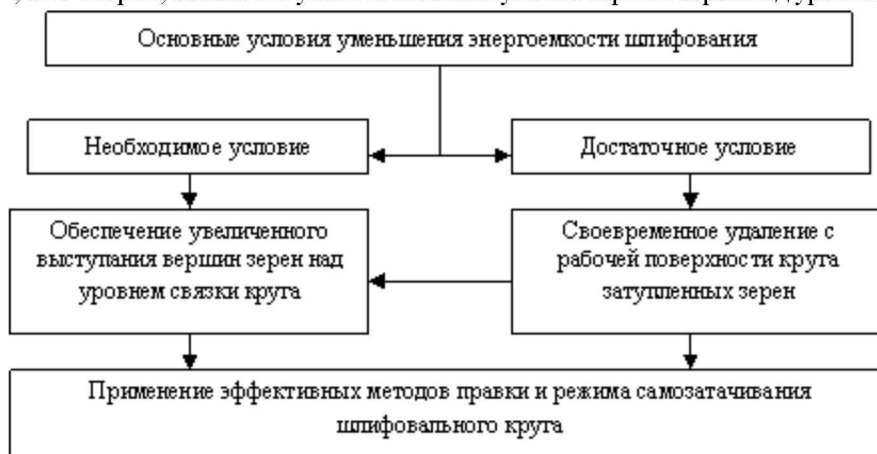


Рис. 2. Структурная схема условий уменьшения энергоёмкости шлифования

Произведем количественную оценку второго слагаемого зависимости (6) для исходных данных: $t/t_{\phi} = 2$; $c = 10^3$ кгс/мм; $\tau = 60$ с; $f = 0,5$; $V_{сп} = 30$ м/с; $B = 20$ мм; $V_{дм} = 30$ м/мин. В итоге получено $30 \cdot 10^3$ кгс/мм². Как видно, это значение существенно меньше аналогичного значения ($15 \cdot 10^6$ кгс/мм²), полученного для случая шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга (рис. 1,а). Следовательно, применение схемы плоского шлифования позволяет уменьшить условное напряжение резания σ , т.е. с точки зрения уменьшения σ целесообразно от схемы шлифования, показанной на рис. 1,а, перейти к схеме плоского шлифования, рис. 1,б. Это связано с более высокой производительностью обработки, достигаемой при плоском шлифовании, и меньшими значениями $V_{сп}$.

Список литературы: 1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 2. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отделение, 1984. – 103 с. 3. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. – М.: Машиностроение, 1984. – 212 с. 4. Новиков Г.В. Повышение эффективности алмазного шлифования деталей с высокопрочными покрытиями. - Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – 2004. – Випуск 26. – С. 10-15. 5. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Серов В.С., Якимов А.А. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.

Поступила в редколлегию 15.03.09